

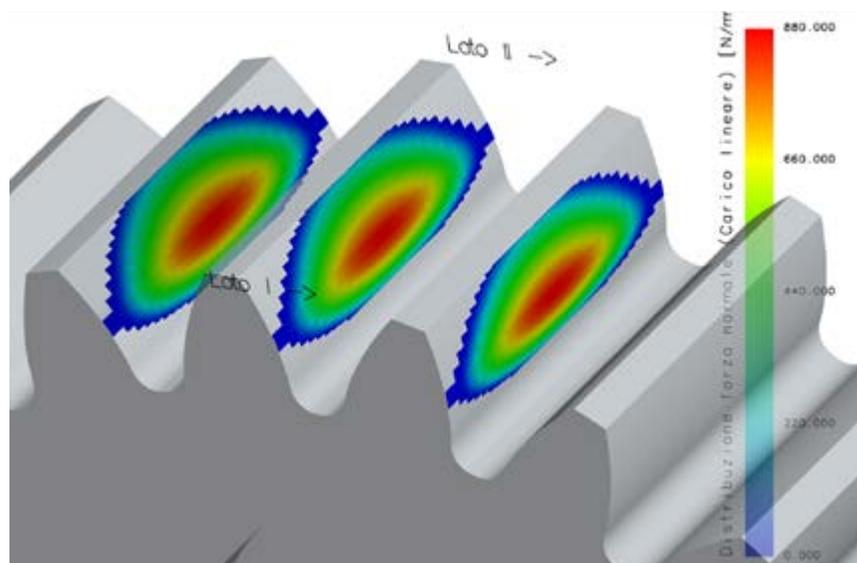
# Ottimizzazione integrata di ruote dentate

OTTIMIZZAZIONE INTEGRATA DELLA PROGETTAZIONE E DELLA PRODUZIONE DI RUOTE DENTATE

Il termine “ottimizzazione” è molto di moda, anche nell’ambito della progettazione degli ingranaggi. Si usa spesso riferito sia alla macro che alla micro-geometria. L’approccio può essere di vari tipi: pre-ottimizzazione analitica, generazione massiva di varianti, utilizzo di ottimizzatori multi-obiettivo e multidisciplinari con algoritmi genetici, perfino intelligenza artificiale. A volte il risultato di tale processo di ottimizzazione è direttamente la soluzione ottimale, altre volte è il progettista a poter scegliere in funzione dei criteri più importanti. Comunque, in tutti questi scenari si dà per ovvio che il produttore di ingranaggi realizzi la geometria indicata dal progettista.

Non è di sicuro il caso dei riduttori industriali a catalogo, per i quali si utilizzano utensili standard e fornitori diversi, neppure è il caso dei riduttori speciali, a commessa, per i quali si cerca di utilizzare utensili già a magazzino. Perfino nel mondo automotive i produttori cercano di tagliare con utensili già disponibili, almeno nella fase di prototipazione e per piccoli lotti.

Dopo aver presentato alcune tecniche di ottimizzazione della progettazione già adottate da diverse aziende, ci sposteremo su scenari in cui le officine si sono dotate di software di selezione guidata dei creatori per ottenere la geometria richiesta. In particolare, ci soffermeremo sul caso in cui un archivio di oltre diecimila creatori esclusivamente cartaceo, con disegni e quote di vario tipo, è stato convertito in formato digitale proprio per questo scopo, permettendo anche la selezione per il taglio con rotolamento modificato, un metodo molto diffuso nell’ambito dell’*automotive*, forse sconosciuto in ambito industriale. Infine, per aziende che eseguono al loro interno sia la progettazione,



sia la produzione degli ingranaggi, verrà presentata l’ottimizzazione dell’intero processo, a partire da un archivio di creatori già disponibili.

## Introduzione

I temi chiave di questo articolo sono progettazione e produzione. Partiamo allora dalle prime parole di due classici testi universitari su questi due argomenti. «Il compito principale degli ingegneri è di applicare le loro competenze scientifiche e ingegneristiche per risolvere problemi di tipo tecnico, e quindi ottimizzare queste soluzioni entro i requisiti e i vincoli imposti da materia-

**TAB. 1 – ISO STANDARDS, TECHNICAL SPECIFICATIONS AND TECHNICAL REPORTS FOR CYLINDRICAL GEAR DESIGN**

Number	Title
ISO 6336-1:2019	Calculation of load capacity of spur and helical gears – Part 1: Basic principles, introduction and general influence factors
ISO 6336-2:2019	Calculation of load capacity of spur and helical gears – Part 2: Calculation of surface durability (pitting)
ISO 6336-3:2019	Calculation of load capacity of spur and helical gears – Part 3: Calculation of tooth bending strength
ISO/TS 6336-4:2019	Calculation of load capacity of spur and helical gears – Part 4: Calculation of tooth flank fracture load capacity
ISO 6336-5:2016	Calculation of load capacity of spur and helical gears – Part 5: Strength and quality of materials
ISO 6336-6:2019	Calculation of load capacity of spur and helical gears – Part 6: Calculation of service life under variable load
ISO/TS 6336-20:2017	Calculation of load capacity of spur and helical gears – Part 20: Calculation of scuffing load capacity (also applicable to bevel and hypoid gears) – Flash temperature method
ISO/TS 6336-21:2017	Calculation of load capacity of spur and helical gears – Part 21: Calculation of scuffing load capacity (also applicable to bevel and hypoid gears) – Integral temperature method
ISO/TS 6336-22:2018	Calculation of load capacity of spur and helical gears – Part 22: Calculation of micropitting load capacity
ISO/TR 6336-31:2018	Calculation of load capacity of spur and helical gears – Part 31: Calculation examples of micropitting load capacity
ISO/TR 6336-30:2017	Calculation of load capacity of spur and helical gears – Part 30: Calculation examples for the application of ISO 6336 parts 1,2,3,5

The image shows a manual calculation sheet for cylindrical gear design. It consists of a grid with 33 numbered rows. Each row contains a mathematical formula or a numerical result. The formulas are related to gear geometry, such as calculating the angle of the tooth, the cosine of the pressure angle, the addendum, and the pitch diameter. The results are calculated based on given input values. The sheet is organized into columns, with some rows spanning across multiple columns. The formulas are written in a clear, legible font, and the results are also clearly displayed. The sheet is a standard tool for engineers and designers working with gears.

Fig. 1 - Foglio di calcolo manuale

li, tecnologia, economia, legislazione, ambiente e persone». [1] «Attraverso la macchina utensile si consegue lo scopo di produrre pezzi che soddisfino dal punto di vista sia tecnico, sia economico prescrizioni di progetto che riguardano la forma, le tolleranze dimensionali e le caratteristiche superficiali». [2]

È evidente come i tre requisiti su “materiali, tecnologia, economia” indicati dal testo di progettazione siano legati alla produzione, e che, reciprocamente, la produzione fa riferimento alle prescrizioni di progetto.

La necessità di integrare sempre più queste due fasi è portata avanti anche dai produttori di sistemi CAD/CAM, al punto che vengono pubblicati e diffusi online libri dal titolo come “Soluzioni di progettazione-produzione integrata: abbassare i costi e aumentare la qualità” [3].

Inoltre, il termine “ottimizzare” è diventato sempre più di moda, soprattutto nei papers presentati ai vari convegni.

Quindi, prima di tutto, affrontiamo singolarmente i quattro termini che sono nel titolo di questo paper (integrazione, ottimizzazione, progettazione, produzione) limitandoci ovviamente all’ambito ingranaggi. Li affronteremo in ordine “cronologico”:

- prima la progettazione, perché l’uomo è prima di tutto *homo sapiens*, pensa, progetta;
- poi la produzione, cioè l’abilità costruttiva che contraddistingue l’*homo faber*, espressione latina ripresa durante il Rinascimento;

TAB. 2  
AGMA STANDARDS FOR CYLINDRICAL GEAR DESIGN

Number	Title
ANSI/AGMA 2001-D04	Fundamental Rating Factors and Calculation Methods for Involute Spur and Helical Gear Teeth
ANSI/AGMA 2101-D04	Fundamental Rating Factors and Calculation Methods for Involute Spur and Helical Gear Teeth (Metric Edition)
ANSI/AGMA 6014-B15	Gear Power Rating for Cylindrical Shell and Trunnion Supported Equipment
ANSI/AGMA 6015-A13	Power Rating of Single and Double Helical Gearing for Rolling Mill Service
ANSI/AGMA 6032-B13	Standard for Marine Gear Units: Rating and Application for Spur and Helical Gear Teeth
ANSI/AGMA 6035-A02	Design, Rating and Application of Industrial Globoidal Wormgearing
ANSI/AGMA 6114-B15	Gear Power Rating for Cylindrical Shell and Trunnion Supported Equipment (Metric Edition)
ANSI/AGMA 6115-A13	Power Rating of Single and Double Helical Gearing for Rolling Mill Service - Metric Edition
ANSI/AGMA 6132-B13	Standard for Marine Gear Units: Rating and Application for Spur and Helical Gear Teeth (Metric Edition)
ANSI/AGMA 6135-A02	Design, Rating and Application of Industrial Globoidal Wormgearing (Metric Edition)
AGMA 932-A05	Rating the Pitting Resistance and Bending Strength of Hypoid Gears

infine, integrazione e ottimizzazione, che sono parole nuove. Ci limiteremo agli ingranaggi cilindrici, i più diffusi. Tralascieremo le viti senza fine, a cui ho già dedicato altre pubblicazioni [4] [5] e le coppie coniche, che sono strettamente brandizzate [6].

## Progettazione

La progettazione degli ingranaggi è tipicamente a durata: l’obiettivo è trasmettere un determinato carico per un certo tempo. Per soddisfare questo requisito si tiene conto dei modi di cedere delle dentature. Il recente aggiornamento della numerazione dei documenti ISO 6336 permette una facile visione d’insieme di quelli principali (bending, pitting, micropitting, scuffing, TFF) e sottolinea l’importanza dell’attenzione al tipo di cedimento per un corretto dimensionamento.

I nomi delle normative (tabelle 1 e 2) giocano invece sulle sfumature che si possono dare agli obiettivi della progettazione: calculation o rating, strength, load capacity, durability, resistance. Dal punto di vista storico, prima di tutto sono stati stabiliti i principi geometrici delle dentature, in particolare quelle a evolvente, e i criteri di verifica, soprattutto a fatica superficiale e flessione [7] e [8].

Le formule presenti nelle varie norme e riferimenti bibliografici sono state poi implementate in fogli di calcolo manuali (figura 1) e poi in foglio di calcolo elettronici e software per semplificare la vita ai progettisti.

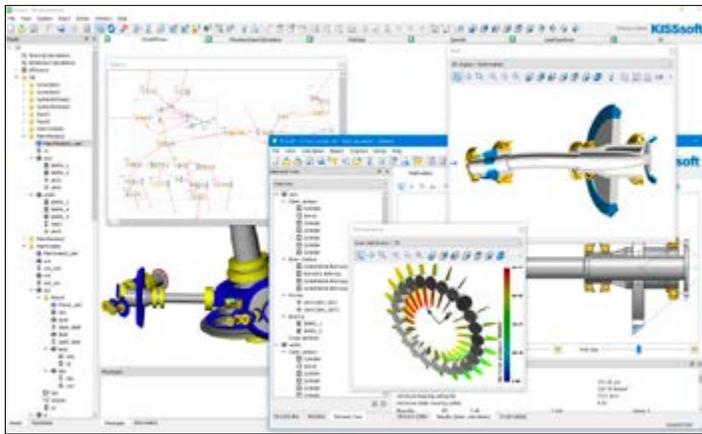


Fig. 2 - Esempio di software per il calcolo degli ingranaggi

Numero denti	z	70
Modulo normale	m <sub>n</sub>	2.75
Angolo di pressione normale	α <sub>x</sub>	20°
Inclinazione elica sul D <sub>p</sub> Senso elica RXX/ SX	β	18°
Diametro esterno	D <sub>e</sub>	207.65 ±0.10
Diametro interno	D <sub>i</sub>	193.97 ±0.05
Dist. fianchi n° 9 denti prima sbarb./rettif.	W <sub>1</sub>	72.060 ±0.01
Dist. fianchi n° 9 denti dopo sbarb./rettif.	W <sub>2</sub>	71.860 ±0.01
Diametro inizio evolvente attiva di dentatura	D <sub>iga</sub>	198.748 Max

Fig. 3 - Dati del disegno di una dentatura

Una delle prime attenzioni in letteratura in ogni luogo del secolo scorso è stata la definizione delle proporzioni da dare agli ingranaggi seguendo le regole introdotte all'inizio, cioè "entro i requisiti e i vincoli imposti da materiali, tecnologia, economia". Ne riportiamo solo alcuni esempi:

Dudley col suo libro dal titolo inequivocabile "Practical Gear Design", successivamente cambiato in "in Handbook of Practical Gear Design" [9];

- Niemann [10] con le formule per suddividere i rapporti di trasmissione di un riduttore ad assi paralleli in modo da minimizzare i costi del materiale di ingranaggi e housing (lavoro ripreso in seguito da Schlecht [11]);
- Severin [12] con la traduzione del libro russo "increasing the load on gearing and decreasing its weight";

Dal punto di vista normativo, i documenti ISO di tabella 1 forniscono strumenti per la verifica, cioè per l'analisi di ingranaggi dalla geometria nota. In alcuni dei documenti AGMA di tabella 2, oltre a strumenti di verifica, vengono forniti suggerimenti per la progettazione, cioè il proporzionalmente, in funzione dell'applicazione. Non ci sono criteri universali: mentre nell'ambito automotive sono diffusi rapporti b/d piccoli, negli impianti di laminazione questo rapporto supera anche l'unità.

### Produzione

Ci limiteremo a trattare ingranaggi cilindrici in metallo, tagliati soprattutto con creatore o coltello o power skiving con eventuale rettifica per riprendere errori da eventuali trattamenti termici o superficiali o per definire modifiche di microgeometria [13]. Tralasciamo per ovvi motivi di spazio ingranaggi dalla geometria

"libera" in plastica, sinterizzati ottenuti per additive manufacturing, fresatura a 5 assi o con fresa di forma.

Dunque, il compito principale di chi riceve il disegno di una dentatura come quello di figura 3 è di definire le dimensioni dell'utensile più adatto, in questo caso il creatore, cercando di non comprarne uno nuovo, ma di sceglierlo fra quelli esistenti (figura 4). Sofferamoci a descrivere alcune situazioni anomale che possono capitare nelle quote del creatore, che ne rendono complicata l'interpretazione della geometria al lettore del disegno di figura 5, che spesso non è neppure in scala. Non c'è una norma che definisca una modalità univoca di quotature di questi utensili.

- Se c'è la protuberanza, solo due quote su tre sono indipendenti.
- Se c'è l'indicazione a parole "raggio pieno" per la testa del dente del creatore, occorre un calcolo iterativo per calcolarne il valore.

- La linea di riferimento, rispetto alla quale sono date le quote come addendum e dedendum, potrebbe non essere quella che divide lo spessore del vano uguale a quello del dente, come invece si aspettano alcuni software di calcolo.

- Il semitopping potrebbe avere una doppia inclinazione o raccordi non quotati nel cambio di angolo di pressione.

Come per la progettazione, anche in questo caso si parla di obiettivo e criteri. L'obiettivo è quello indicato nell'introduzione "produrre pezzi che soddisfino dal punto di vista sia tecnico, sia economico prescrizioni di progetto che riguardano la forma, le tolleranze dimensionali e le caratteristiche superficiali".

La scelta del creatore che porti a ottenere la forma richiesta si può fare inserendo i dati della geometria richiesta e quelli del creatore (univocamente determinati) in appositi software di calcolo (figura 6) e sovrapponendo la geometria calcolata con quella prodotta per involuppo (figura 7). Ad esempio, nel caso venga usato un utensile di prerettifica senza protuberanza, è facile notare la presenza dell'intaglio di rettifica.

È il tipico caso di riduttori industriali di modulo piccolo, non certo di ingranaggi per automotive. Raggiunto l'obiettivo tecnico, il criterio per trovare la scelta più economica non è univoco.

Si potrebbe ad esempio cercare di ottenere il massimo rendimento del creatore K [14]

$$K = \frac{p \cdot z \cdot l \cdot t_{os}}{1000 \cdot i_{os} \cdot \cos\beta \cdot b_1} \quad (1)$$

dove

- K è il rendimento del creatore; in m/dente
- p è il numero di ruote (pezzi) da produrre
- z è il numero di denti della ruota
- l è la larghezza di fascia della ruota; in mm
- t<sub>os</sub> è il passo assiale del creatore; in mm
- i<sub>o</sub> è il numero di taglienti del creatore
- β è l'angolo dell'elica della ruota
- b<sub>1</sub> è la lunghezza di lavoro del creatore (figura 8)

Il rendimento K dovrebbe essere compreso fra 4 e 5 m/dente per essere considerato buono. Prima di calcolare K è necessario fissare a quale livello di usura del creatore arrivare prima di sostituirlo.

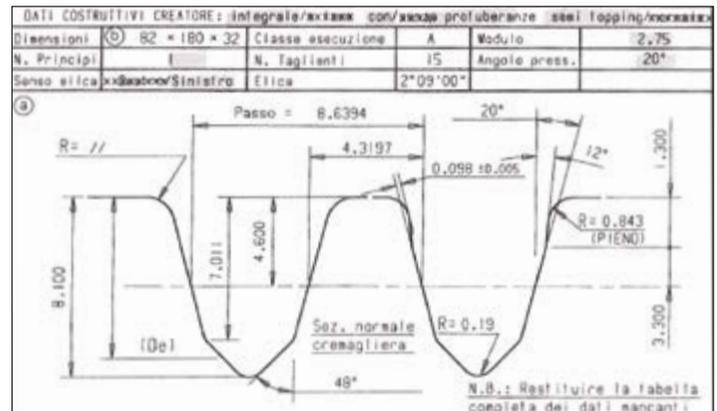
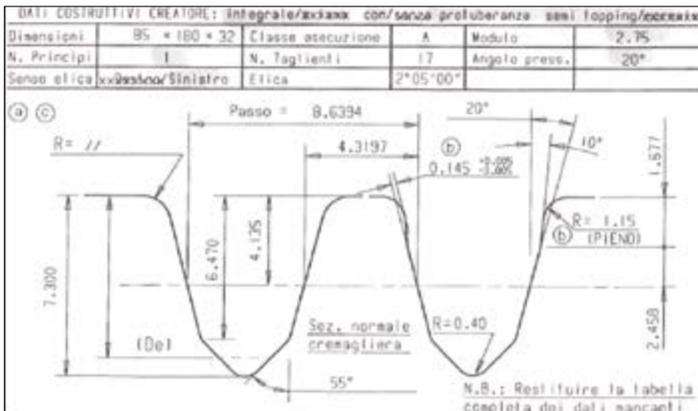
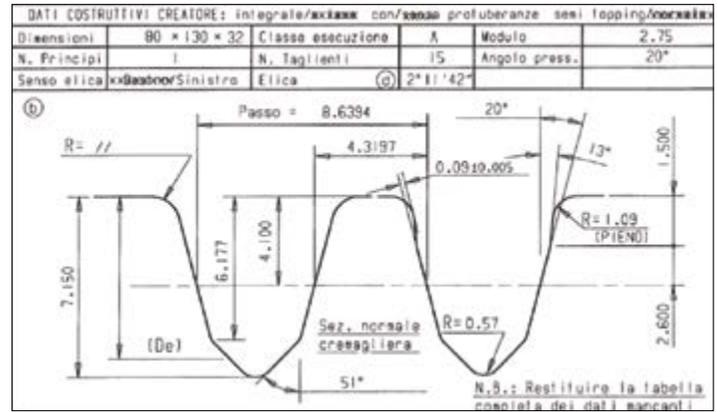
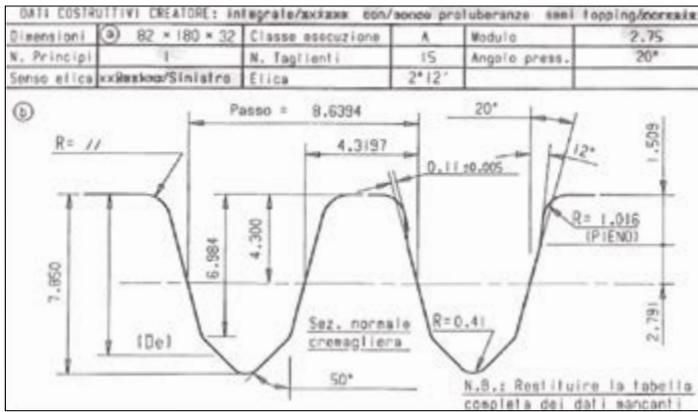


Fig. 4 - Differenti creatori con lo stesso modulo e angolo di pressione di figura 3

tuirlo e considerare anche il costo dell'utensile e dell'affilatura. Anche se sono stati proposti metodi più sofisticati [15], si può ancora usare la formula di Hoffmeister per calcolare lo spessore massimo del truciolo dato un certo avanzamento per giro pezzo

$$h_{1,max} = 4,9 \cdot m_n \cdot z_0^{(9,25 \cdot 10^{-3} \cdot \beta_0 - 0,542)} \cdot z^{-0,015(\beta_0 + x_p)} \cdot \left(\frac{f_a}{m_n}\right)^{0,511} \cdot \left(\frac{d_{a0}}{2 \cdot m_n}\right)^{(-8,25 \cdot 10^{-3} \cdot \beta_0 - 0,225)} \cdot \left(\frac{i_0}{z_0}\right)^{-0,877} \cdot \left(\frac{h}{m_n}\right)^{0,319} \quad (2)$$

dove

- $h_{1,max}$  è il massimo spessore del truciolo
- $m_n$  è il modulo normale
- $\beta_0$  è l'angolo dell'elica del creatore
- $x_p$  è il fattore di spostamento del profilo della ruota
- $f_a$  è l'avanzamento assiale
- $d_{a0}$  è il diametro di testa del creatore
- $i_0$  è il numero di taglienti
- $z_0$  è il numero di principi del creatore
- $h$  è la profondità di taglio

A proposito di parametri di taglio, vale la pena ricordare che è possibile stimare gli errori di profilo  $\epsilon_1$  ed elica  $\epsilon_2$  dovuti al valore di avanzamento (figura 9).

$$\epsilon_1 = R_p \cdot \tan \alpha \cdot \left(1 - \cos \frac{\eta}{2}\right) \quad \text{dove } \eta = \frac{360 \cdot z_0}{z \cdot i_0} \quad (3)$$

$$\epsilon_2 = \frac{f_a^2 \cdot \cos^2 \beta_0 \cdot \text{tg} \alpha}{8 \cdot R_p} \quad (4)$$

dove

- $\epsilon_1$  è l'errore di profilo
- $\epsilon_2$  è l'errore di elica
- $z_0$  è il numero di denti del creatore
- $i_0$  è il numero di principi del creatore
- $z$  è il numero di denti della ruota dentata
- $R_p$  è il raggio primitivo del creatore; mm
- $f_a$  è l'avanzamento; mm/giro
- $\beta_0$  è l'angolo dell'elica del creatore
- $\alpha$  è l'angolo di pressione

A parità di profilo di riferimento, la scelta delta del creatore è quindi determinata da

- altre caratteristiche geometriche del creatore, come numero di taglienti, diametro esterno, numero di principi, lunghezza angolo dell'elica;
- parametri di taglio, come velocità di taglio e avanzamento/dente, i cui valori consigliati si trovano in bibliografia [14];
- numero di pezzi da tagliare.

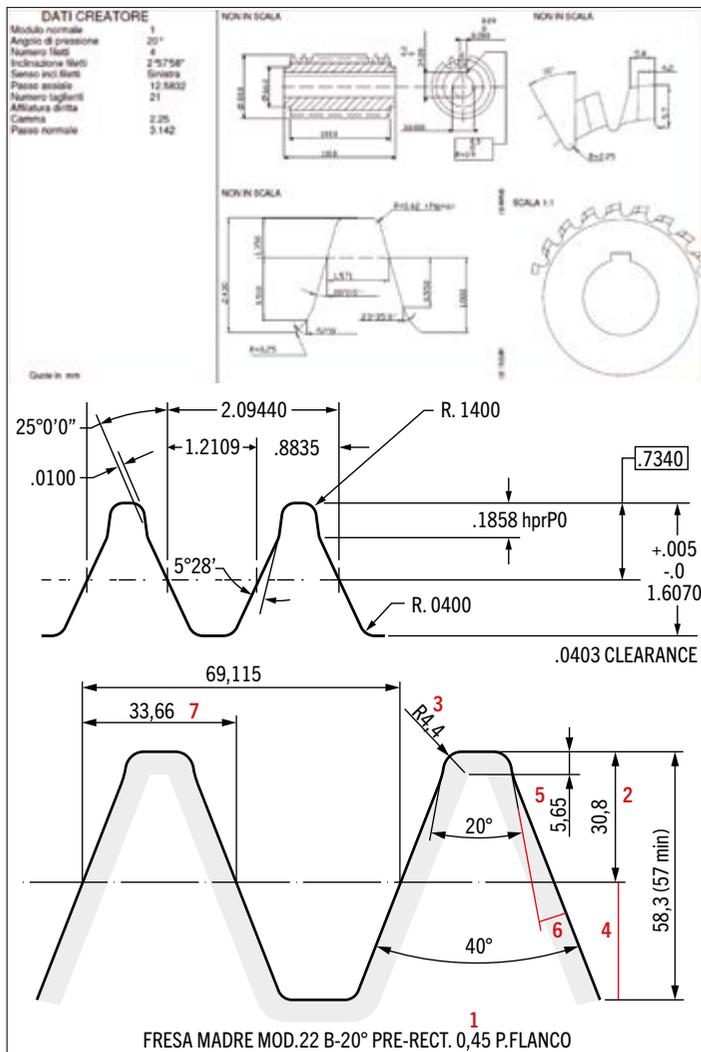


Fig. 5 - Dimensionamento di creatori non standard

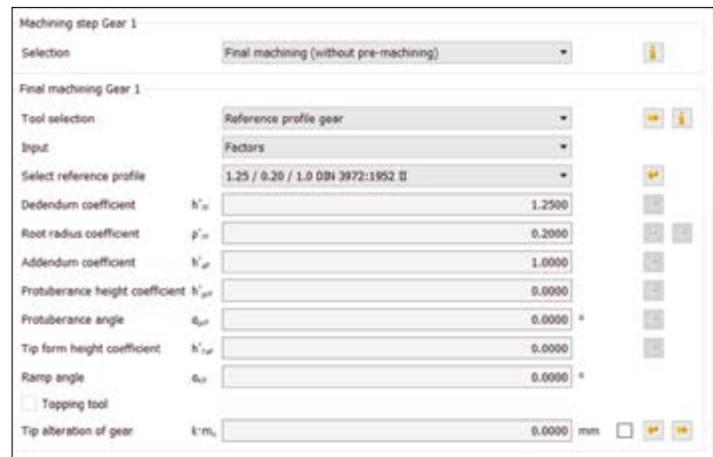


Fig. 6 - Dati di progetto e produzione

Tutti questi valori possono essere usati nelle eq. (2) e (1), in modo da verificare che:

- lo spessore del truciolo non sia troppo alto;
- il rendimento rientri nell'intervallo 4-5 m/dente.

Ma questo non è l'unico criterio per stimare la convenienza di determinate condizioni di lavoro. È molto comune, ad esempio, la scelta di privilegiare l'aumento della velocità di taglio e quindi la riduzione del tempo di taglio rinunciando a un buon rendimento del creatore.

Abbiamo cercato di presentare semplici formule dal profondo valore didattico [14]. Altri esempi si trovano in [16] e [17]. Un approccio più rigoroso si trova in [18]. Per i coltelli, si veda [19].

### Ottimizzazione

Di seguito tratteremo di ottimizzazione di progettazione e ottimizzazione di produzione come attività distinte, indipendenti, la prima applicabile in ufficio tecnico, la seconda in officina, come se fossero svolte da aziende diverse, una di engineering, l'altra terzista.

#### Ottimizzazione della progettazione

Come indicato nell'introduzione, la progettazione consiste nella

scelta di varianti. Generarle e sceglierle fa parte invece dell'ottimizzazione. Senza entrare nel dettaglio, il concetto di ottimizzazione parte da tre concetti: obiettivo/i, vincoli, variabili. Definiti questi tre, si ottengono in genere numerose varianti, fra le quali va scelta la soluzione ottimale, in base a ben definiti criteri. Vediamo un po' di casi di ottimizzazione applicata alla sola progettazione di ingranaggi.

#### Ottimizzazione analitica

Schöler [20], qualche anno fa, ha presentato un'evoluzione, quindi un'ottimizzazione, delle classiche formule di proporzionamento e pre-dimensionamento viste nel cap. 2. L'articolo si riferisce agli ingranaggi beveloid, ma rende bene l'idea di quello che è stato fatto anche nei cilindrici.

#### Generazione rapida di varianti

Kissling [21] ha mostrato come possa essere rapida la generazione di varianti di macrogeometria in un software già ampiamente diffuso negli uffici tecnici (figura 10). Le numerose varianti generate (figura 11) vengono in seguito selezionate dal progettista con l'aiuto di filtri e grafici (figura 12). La scelta è lasciata all'uomo. Lo stesso approccio viene usato per generare varianti di microgeometria, come presentato allo scorso FTM [22].

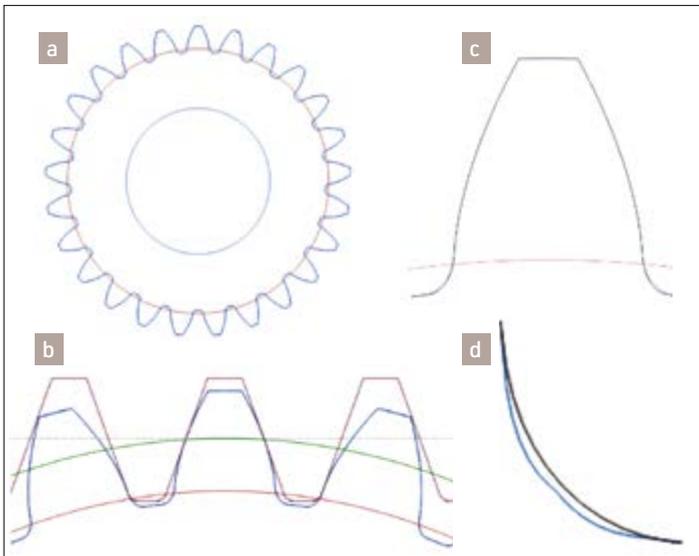


Fig. 7 - a) Forma del dente richiesta; b) simulazione hobbing; c) confronto fra forma del dente richiesta (nero) e base (blu); d) focus sull'intaglio di rettifica

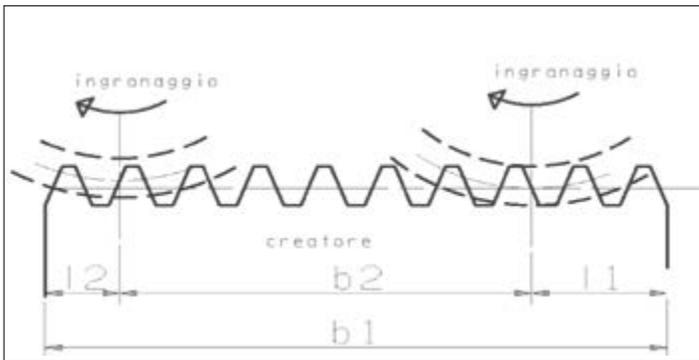


Fig. 8 - Creatore e ingranaggio

### Ottimizzatori commerciali multiobiettivo

Bonfiglioli [23] e Noesis [24] hanno presentato l'utilizzo di un ottimizzatore multiobiettivo interfacciato con un software di calcolo ingranaggi. ModeFrontier si è occupato del progetto dell'esperimento (DOE), mentre KISSsoft del calcolo di ogni singola variante. A fronte di tempi di elaborazione più lunghi, il criterio di generazione delle varianti è più performante e la reportistica più funzionale.

### Ottimizzatori per supercomputer

UniMoRe ha recentemente reso disponibile ad alcune aziende [25] l'ottimizzatore ad algoritmo genetico sviluppato all'università [26] e funzionante esclusivamente su supercomputer.

### Intelligenza artificiale

Schlecht [27] è arrivato addirittura a sfruttare l'intelligenza artificiale per trovare la modifica di fianco ottimale per una coppia di ingranaggi cilindrici a denti dritti. Rispetto a tutti i metodi precedentemente descritti, in questo caso è necessaria una fase di addestramento del motore di AI, ma si può fare a meno di sofisticati software di analisi del contatto.

### Ottimizzazione della produzione

Gli stessi concetti visti per l'ottimizzazione della progettazione

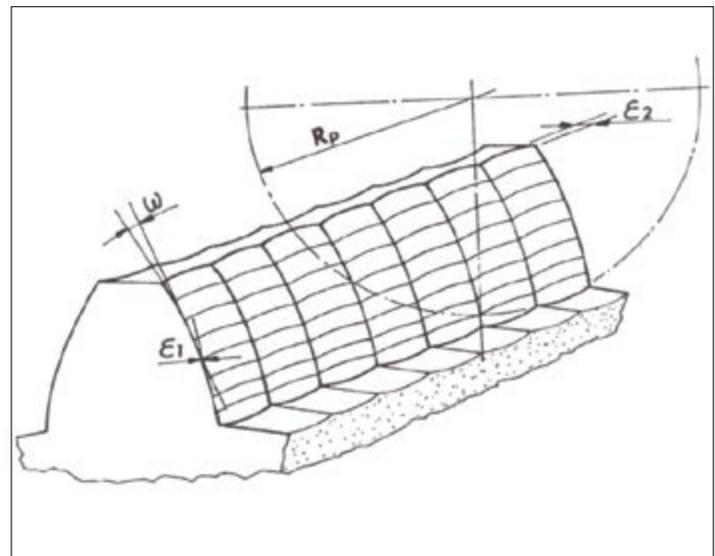


Fig. 9 - Errori di profilo e di elica dovuti all'avanzamento del creatore

Maximal no. of solutions		250	
Nominal ratio/deviation in +/- %		3.0400	5.0000
		Minimum	Maximum
Normal module	m	2.0000	5.0000 mm
Normal pressure angle	alpha_n	20.0000	20.0000 °
Helix angle at reference circle	beta	8.0000	21.0000 °
Center distance	a	303.0000	303.0000 mm
Range for profile shift coefficient	x	-0.6000	1.0000
		Gear 1	Gear 2
Maximum tip diameter	d_max	99999.0000	99999.0000 mm
Minimum root diameter	d_min	0.0000	0.0000 mm
Fix number of teeth	z	25	76
Fix profile shift coefficient	x	0.2485	-0.2485
Face width	b	44.0000	44.0000 mm

Fig. 10 - Generazione di varianti di macrogeometria

possono essere applicati in produzione. Anche in questo caso l'ottimizzazione passa dalla scelta della variante migliore, cioè dalla scelta del creatore che "copia" la geometria dell'ingranaggio a disegno al costo più basso.

Come indicato precedentemente, l'obiettivo potrebbe essere il rendimento del creatore compreso fra i valori indicati precedentemente. I vincoli sono quelli di generare il profilo voluto e di mantenere i parametri di taglio nei range consigliati. L'unica variabile è il creatore. È ovviamente necessario un software che possa eseguire i calcoli indicati nel paragrafo dedicato alla "Produzione". Un esempio di selezione di creatore da database in KISSsoft è visibile in figura 13.

### Database Utensili

Prima di illustrare il processo di selezione ottimizzata del creatore, soffermiamoci sul database utensili. È necessario disporre di un database informatico con tutte le caratteristiche dei creatori. La piattaforma utilizzata può andare dal semplice foglio di Excel al PLM.

Si va da officine che tagliano ingranaggi per riduttori di media grandezza (con modulo da 0.5 a 7 mm), che hanno 400 creatori gestiti con un foglio di Excel (figura 14) a quelle che lavora-

Nr.	a [mm]	b <sub>1</sub> [mm]	b <sub>2</sub> [mm]	m <sub>1</sub> [mm]	α <sub>1</sub> [°]	β [°]	x <sub>1</sub>	x <sub>2</sub>	x <sub>3</sub>	x <sub>4</sub>	d <sub>10</sub> [mm]	d <sub>20</sub> [mm]	ε <sub>1</sub>	ε <sub>2</sub>
0	303.000	44.000	44.000	6.000	20.000	0.000	25	76	0.248	-0.248	164.982	465.018	1.662	
1	303.000	44.000	44.000	2.000	20.000	8.000	72	226	0.157	0.904	149.941	463.954	1.725	
2	303.000	44.000	44.000	2.000	20.000	8.000	72	226	0.257	0.804	150.341	463.554	1.718	
3	303.000	44.000	44.000	2.000	20.000	8.000	72	226	0.357	0.704	150.741	463.154	1.709	
4	303.000	44.000	44.000	2.000	20.000	8.000	72	227	0.032	0.505	149.516	464.455	1.776	
5	303.000	44.000	44.000	2.000	20.000	8.000	72	227	0.132	0.405	149.916	464.055	1.769	
6	303.000	44.000	44.000	2.000	20.000	8.000	72	227	0.232	0.305	150.316	463.655	1.759	
7	303.000	44.000	44.000	2.000	20.000	8.000	72	228	-0.087	0.113	149.068	464.932	1.821	
8	303.000	44.000	44.000	2.000	20.000	8.000	72	228	0.013	0.013	149.468	464.532	1.812	
9	303.000	44.000	44.000	2.000	20.000	8.000	72	228	0.113	-0.087	149.868	464.132	1.802	
10	303.000	44.000	44.000	2.000	20.000	8.000	72	229	-0.199	-0.274	148.596	465.383	1.856	
11	303.000	44.000	44.000	2.000	20.000	8.000	72	229	-0.099	-0.374	148.996	464.983	1.847	
12	303.000	44.000	44.000	2.000	20.000	8.000	72	229	0.001	-0.474	149.396	464.583	1.837	
13	303.000	44.000	44.000	2.000	20.000	8.000	73	225	0.159	0.903	151.966	461.929	1.726	
14	303.000	44.000	44.000	2.000	20.000	8.000	73	225	0.259	0.803	152.366	461.529	1.719	
15	303.000	44.000	44.000	2.000	20.000	8.000	73	225	0.359	0.703	152.766	461.129	1.710	
16	303.000	44.000	44.000	2.000	20.000	8.000	73	226	0.032	0.506	151.534	462.437	1.777	
17	303.000	44.000	44.000	2.000	20.000	8.000	73	226	0.132	0.406	151.934	462.037	1.770	
18	303.000	44.000	44.000	2.000	20.000	8.000	73	226	0.232	0.306	152.334	461.637	1.761	
19	303.000	44.000	44.000	2.000	20.000	8.000	73	227	-0.089	0.115	151.079	462.921	1.821	
20	303.000	44.000	44.000	2.000	20.000	8.000	73	227	0.011	0.015	151.479	462.521	1.813	
21	303.000	44.000	44.000	2.000	20.000	8.000	73	227	0.111	-0.085	151.879	462.121	1.803	
22	303.000	44.000	44.000	2.000	20.000	8.000	73	228	-0.203	-0.270	150.599	463.379	1.857	
23	303.000	44.000	44.000	2.000	20.000	8.000	73	228	-0.103	-0.370	150.999	462.979	1.848	
24	303.000	44.000	44.000	2.000	20.000	8.000	73	228	-0.003	-0.470	151.399	462.579	1.838	
25	303.000	44.000	44.000	2.000	20.000	8.000	74	224	0.160	0.901	153.992	459.903	1.726	
26	303.000	44.000	44.000	2.000	20.000	8.000	74	224	0.260	0.801	154.392	459.503	1.719	
27	303.000	44.000	44.000	2.000	20.000	8.000	74	224	0.360	0.701	154.792	459.103	1.711	
28	303.000	44.000	44.000	2.000	20.000	8.000	74	225	0.031	0.506	153.552	460.419	1.778	
29	303.000	44.000	44.000	2.000	20.000	8.000	74	225	0.131	0.406	153.952	460.019	1.770	
30	303.000	44.000	44.000	2.000	20.000	8.000	74	225	0.231	0.306	154.352	459.619	1.762	
31	303.000	44.000	44.000	2.000	20.000	8.000	74	226	-0.091	0.117	153.090	460.910	1.822	
32	303.000	44.000	44.000	2.000	20.000	8.000	74	226	0.017	0.017	153.490	460.510	1.814	

Fig. 11 - Lista di generazione di varianti

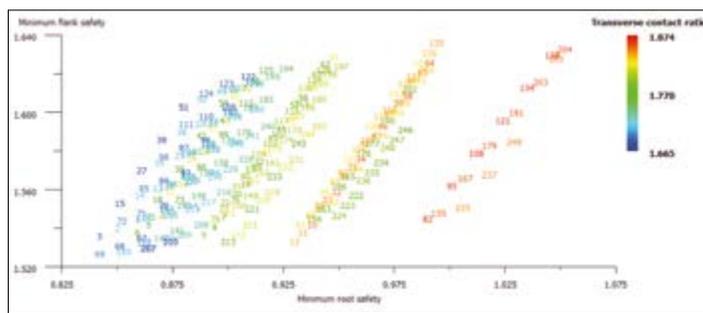


Fig. 12 - Grafico con fronte di Pareto

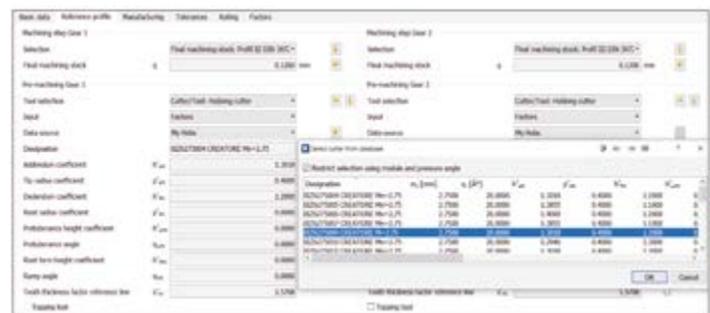


Fig. 13 - Selezione di creatore da database in KISSsoft

no per l'automotive e ne hanno 650 su un database Oracle in cui vengono registrate anche le affilature (figura 15). Ci sono anche officine che lavorano per *automotive* e agricoltura che gestiscono oltre 10000 creatori di cui dispongono esclusivamente di schede cartacee.

Il primo passo è dunque quello di inserire i dati su un database informatico. È stato preparato un foglio di Excel con alcune formule per armonizzare i diversi modi di quotare i creatori indicati in precedenza.

L'enorme mole di lavoro che richiede la compilazione del database è giustificabile solo dal risparmio economico ottenuto dal processo indicato nel prossimo paragrafo.

In ogni caso, il database deve contenere queste informazioni:

- profilo di riferimento (modulo, angolo di pressione, addendum, dedundum, raggio di testa e di piede, protuberanza, semitop-ping);
- caratteristiche geometriche (diametro del creatore, lunghezza di taglio, angolo e senso dell'elica, numero di taglienti, numero di principi, materiale, rivestimento);
- condizioni di lavoro (sovrametallo consigliato).

A volte il database include anche i dati [28] o i disegni del rav-

vivatore (figura 16), in modo da poter scegliere allo stesso modo anche la moletta per ravvivare la mola e ottenere la spoglia di testa richiesta.

**Workflow**

Il processo per arrivare a generare una lista di creatori utilizzabili per tagliare la dentatura richiesta è indicato nel diagramma di flusso di figura 17. Fra le varianti proposte, la soluzione ottimale è quella che soddisfa al meglio i criteri imposti. Analogamente a quanto visto nel paragrafo "Database Utensili", anche in questo caso occorrerà muoversi sul fronte di Pareto. Il procedimento può essere ulteriormente sofisticato e tener conto del rotolamento modificato [29]. In questo caso i creatori non saranno inizialmente filtrati rigorosamente in base a modulo e angolo di pressione, ma si accetteranno entrambi questi valori in un range di tolleranza. Il controllo sulla geometria ottenuta per inviluppo non sarà esclusivamente sui diametri di testa e fondo, ma anche sulla deviazione di profilo, che dovrà rimanere entro valori recuperabili con la rettifica. Questa operazione può essere svolta se la prima selezione non ha portato ad almeno una soluzione o se è prassi dell'officina tagliare con rotolamento modificato o se si sta facendo un prototipo o un piccolo lotto.

ITEMA CREATORE	A	B	C	D	E	F	G	H	I	L	M	N	O	P
2	molto normale	Angolo di pressione	Altezza Creatore	Altezza Testa Creatore	Altezza Creatore	Altezza Profondità								
4	27421	0,750	20	0,000	0,000	2,279	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	1,000
5	801	0,750	20	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	1,000
6	8011	0,750	20	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	1,000
7	802	0,750	20	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	1,000
8	8022	0,750	20	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	1,000
9	8023	0,750	20	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	1,000
10	8024	0,750	20	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	1,000
11	8025	0,750	20	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	1,000
12	8026	0,750	20	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	1,000
13	8027	0,750	20	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	1,000
14	8028	0,750	20	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	1,000
15	8029	0,750	20	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	1,000
16	803	0,750	20	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	1,000
17	804	0,750	20	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	1,000
18	805	0,750	20	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	1,000
19	806	0,750	20	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	1,000
20	807	0,750	20	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	1,000

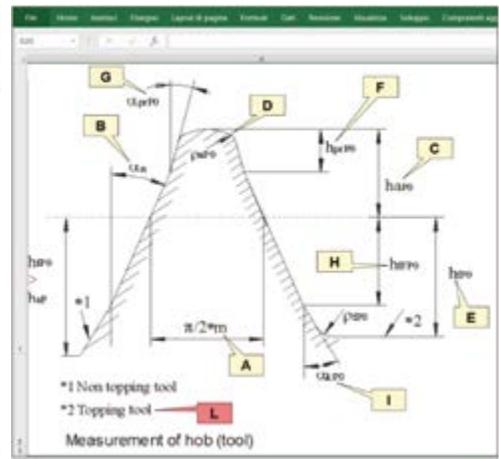


Fig. 14 - Database creatori gestito con foglio di Excel

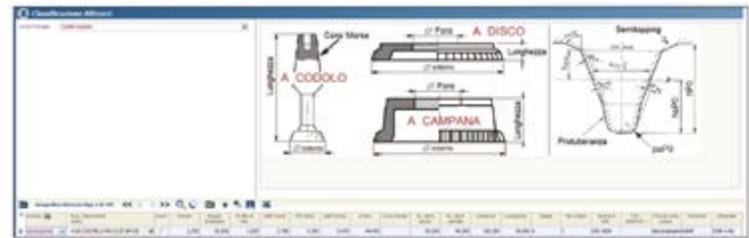


Fig. 15 - Database per le affilature in Oracle

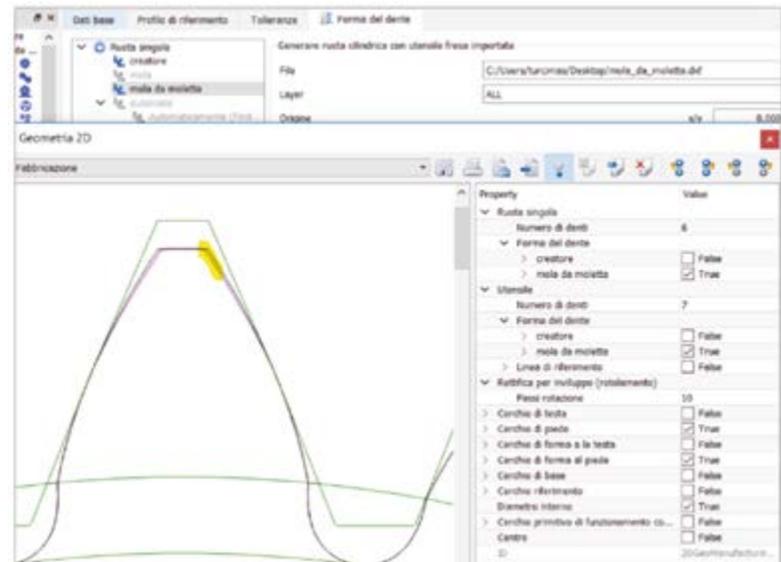
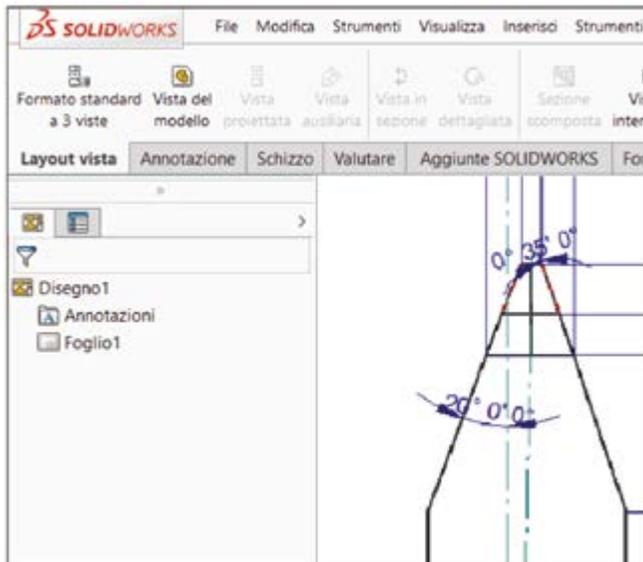


Fig. 16 - A volte il database include anche i dati o i disegni del ravnivatore, in modo da poter scegliere allo stesso modo anche la moletta per ravnivare la mola

## Integrazione

Il senso del termine “integrazione” all’interno di questo articolo va oltre quello usato da Norton nel titolo del suo libro “Machine design: an integrated approach” [30] dove indica invece l’approccio didattico, quello di affrontare molteplici elementi di macchine all’interno dello stesso assieme e spesso volte reciprocamente dipendenti. Come anticipato nell’introduzione, l’integrazione di cui trattiamo è quella fra progettazione e produzione: è diventato ormai un must o perlomeno un leit-motiv di tante aziende. Infatti, le decisioni di progettazione hanno un impatto significativo su costi di produzione e qualità del prodotto. Alla fine della fase di progettazione, si sono definiti dal 70 all’80

% dei costi di produzione finali e l’80 % del lavoro che ha un impatto sulla qualità del prodotto (figura 19). Inoltre, più avanti si è nel ciclo di sviluppo, più diventa costoso apportare modifiche (figura 20). Ad esempio, una volta che si ordina il creatore, eventuali modifiche geometriche in progettazione hanno implicazioni costosissime.

## Ottimizzazione integrata

Siamo giunti al culmine di questa scalata dei quattro termini indicati nel titolo dell’articolo. Per realizzare un’ottimizzazione integrata di progettazione e produzione, il passo è corto. È stato necessario:

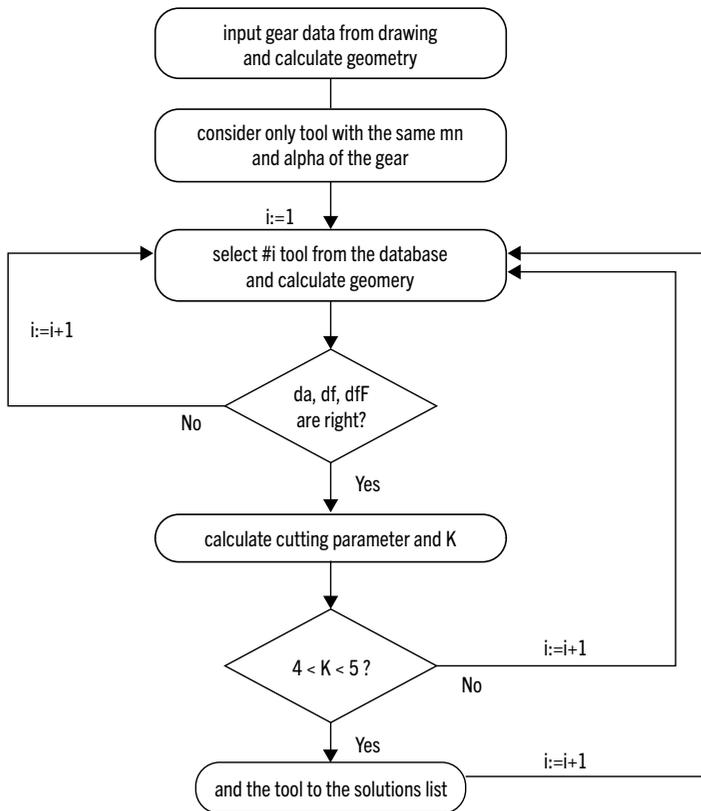


Fig. 17 - Processo per arrivare a generare una lista di creatori (varianti)

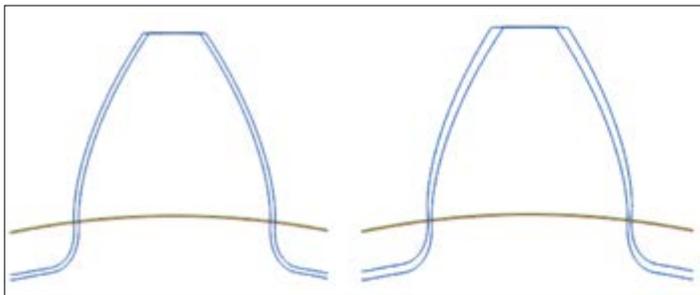


Fig. 18 - Il controllo sulla geometria ottenuta per involuppo non sarà esclusivamente sui diametri di testa e fondo, ma anche sulla deviazione di profilo

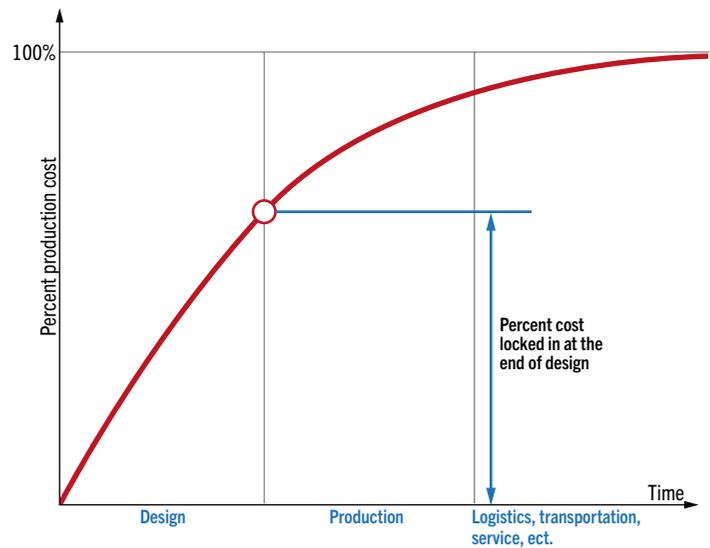


Fig. 19 - Fino all'80 % dei costi di produzione finali sono legati alla fase di progettazione (Fonte: Dowlatshani in [3])

- adottare un unico software di calcolo ingranaggi in ufficio tecnico e officina. Generalmente prima è scelto dall'ufficio tecnico e poi adottato in produzione;
- condividere lo stesso database creatori fra produzione e progettazione. Se nel punto precedente, il primo passo era stato fatto dall'ufficio tecnico, in questo caso è l'officina a condividere le sue informazioni;
- il generatore di varianti di progettazione, anziché spazzolare su variabili geometriche solo a livello matematico (ad esempio, angolo di pressione, modulo, addendum dedendum) può limitarsi a proporre geometrie generabili con i soli creatori presenti nel database (figura 21) [21]. Per ciascuna variante (figura 11), potrebbe essere visualizzata anche il rendimento del creatore, in modo da aiutare il progettista nella scelta della soluzione ottimale, la migliore sia per il progettista stesso, sia per l'officina. I vantaggi sono per tutta l'azienda:
  - un risparmio economico nell'acquisto di nuovi creatori, perché il progettista si limita a proporre geometrie che possano essere generate con utensili già disponibili in officina, piuttosto che combinazioni esclusivamente matematiche di grandezze come addendum, dedendum e angolo di pressione;
  - il progettista acquisisce consapevolezza di cosa sarà prodotto, a livello di efficienza del creatore, qualità di pre-rettifica e addi-

**BIBLIOGRAFIA**

[1] G. Pahl and W. Beitz, Engineering Design: A Systematic Approach, 1st ed. London: Springer Verlag, 1988.	[6] H. J. Stadtfeld, Practical Gear Engineering. Rochester, N.Y.: The Gleason Works, 2019.	[11] B. Schlecht, Maschinenelemente 2: Getriebe, Verzahnungen und Lagerungen. München: Pearson Studium, 2009.	[13] M. Turci, "Design and optimization of a hybrid vehicle transmission," presented at the Fall Technical Meeting (FTM), Chicago, 2018.
[2] O. Zurla, Appunti di macchine utensili, 2nd ed. CLUEB, 1984.	[7] E. Buckingham, Spur gears: Design, operation, and production. New York: McGraw-Hill, 1928.	[12] M. M. Saverin, Tran., Increasing the loading on gearing and decreasing its weight (original work: Povysheniye nagruznochnoy sposobnosti zubchatykh peredach i snizheniye vesa). New York: Pergamon Press, 1961.	[14] G. Bianco, La dentatura con creatore. Bologna: Samp Utensili, 2004.
[3] "Integrated design to manufacturing solutions: lower costs and improve quality," Dessault Système, Waltham MA, 2007.	[8] L. Soria, Tecnica degli Ingranaggi. Torino: Viglongo, 1948.	[15] C. Brecher, M. Brumm, and M. Krömer, "Design of Gear Hobbing Processes Using Simulations and Empirical Data," Procedia CIRP, vol. 33, pp. 484-489, Jan. 2015, doi: 10.1016/j.procir.2015.06.059.	[16] F. Momper, "Un approccio moderno alla scelta del creatore," presented at the Gleason Technology Days, Rezzato BS, 2017.
[4] M. Turci and G. Giacomozzi, "The Whirling Process in a Company that Produces Worm Gear Drives," presented at the Fall Technical Meeting (FTM), Pittsburgh, 2016.	[9] S. P. Radzevich, Ed., Dudley's Handbook of Practical Gear Design and Manufacture, 2nd ed. Boca Raton: CRC Press, 2012.		
[5] M. Turci, E. Ferramola, F. Bisanti, and G. Giacomozzi, "Worm			

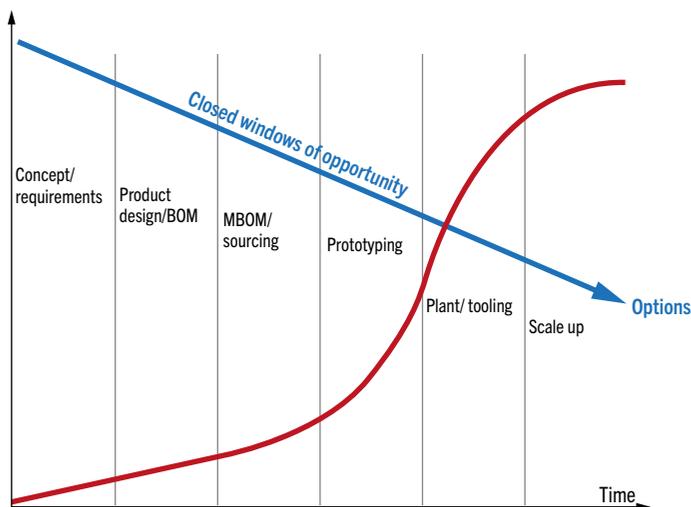


Fig. 20 - Più avanti si è nel ciclo di sviluppo, più diventa costoso apportare modifiche (Fonte: Tech-Clarity in [3])

rittura twist di rettifica, come ad esempio nel caso di KISSsoft, che ha inglobato il know-how della casa madre Gleason, che produce utensili e macchine utensili [21];

- la produzione ha già il file con i dati di dentatura e del creatore: non deve interpretare il disegno, né inserire i dati del creatore, se scelto dal database. Può quindi concentrarsi sugli aspetti esclusivamente tecnologici.

## Conclusioni

Lo spirito che ha portato alla stesura di questo articolo è la condivisione di informazioni, il desiderio di fare rete, che è lo stesso obiettivo dell'AGMA, soprattutto del Fall Technical Meeting al quale è stato presentato. In questo paper non sono state proposte nuove formule o tecnologie. Sono stati presentati lo stato dell'altre, le buone prassi, alcuni casi concreti incontrati in diverse situazioni e realtà aziendali da cui prendere spunto. Sono stati descritti "semplici" strumenti già in mano:

- ad alcuni progettisti per capire se esiste già un utensile per realizzare la ruota dentata che stanno pensando,
- alle relative officine per evitare di dover spendere tempo a re-interpretare i disegni e per velocizzare la ricerca dell'utensile ideale.

Se il disegno è un modo per codificare le informazioni del proget-

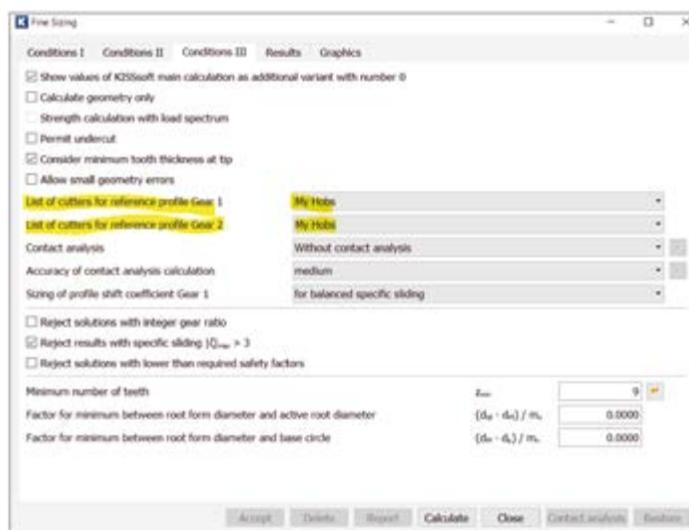


Fig. 21 - Esempio di DOE

to e la sua lettura ne è la decodifica, si è mostrato un esempio di CoDec (termine caro all'informatica in ambito audio e video che indica CODifica-DECodifica) fra progettazione e produzione. •

## Ringraziamenti

L'Autore desidera ringraziare prima di tutto la KISSsoft (del gruppo Gleason) per il software fornito. Un ringraziamento particolare va alle aziende Varvel – Mechnology, CIMA (del gruppo Coesia), Graziano (ora parte del gruppo Dana) e CEI, che in questi anni hanno dedicato risorse per l'ottimizzazione integrata di progettazione e produzione, condividendo al loro interno, lo stesso software e lo stesso database di creatori e coltelli in progettazione e produzione.

Articolo tratto da una relazione presentata all'AGMA FTM 2021 e stampato con l'autorizzazione dell'American Gear Manufacturers Association, proprietaria dei diritti d'autore.

American Gear Manufacturers Association, 1001 N. Fairfax Street, 5th Floor, Alexandria, Virginia 22314.

Le dichiarazioni e le opinioni espresse in questo testo sono quelle degli autori e non sono da considerarsi ufficiali dell'American Gear Manufacturers Association.

Si ringrazia l'AGMA per la gentile autorizzazione alla pubblicazione (Ndr).

[17] J. Zhou and D. Sari, "Selecting Correct Size of Hob/Gashing Cutter (ask the expert)," GEAR TECHNOLOGY, Aug. 2020.

[18] S. P. Radzevich, Gear Cutting Tools: Science and Engineering, 2nd ed. Boca Raton: CRC Press, 2010.

[19] Gear cutting tools, manual for design and manufacturing, 3rd ed. Ettlingen: Verzahntechnik Lorenz GmbH & Co, 1980.

[20] T. Schöler, H. Binz, and M. Bachmann, "Method for the pre-dimensioning of beveloid gears - Efficient design of main gearing data," presented at the International Conference on Gears,

Munich, 2017.

[21] U. Kissling, U. Stolz, and A. Turich, "Combining gear design with manufacturing process decisions, VDI International Conference on Gears," presented at the International Conference on Gears, Munich, 2017.

[22] U. Kissling, "Sizing of Profile Modifications for Asymmetric Gears," presented at the Fall Technical Meeting (FTM), Detroit, 2019.

[23] M. Franchini, "Multi-objective optimization of a transmission system for an electric counterbalance forklift," presented at the International CAE conference, Parma, 2016.

[24] M. Olson, "Optimierung eines Stirnradpaares in einer Kontaktanalyse," presented at the Schweizer Maschinenelemente Kolloquium (SMK), 2018.

[25] F. Pellicano, "Overview," presented at the The Gear Day, Modena, 2018.

[26] G. Bonori, M. Barbieri, and F. Pellicano, "Optimum profile modifications of spur gears by means of genetic algorithms," Journal of Sound and Vibration, vol. 313, no. 3, pp. 603–616, Jun. 2008, doi: 10.1016/j.jsv.2007.12.013.

[27] B. Schlecht and T. Schulze, "Improved tooth contact analysis by using virtual

gear twins. How helpful is AI for finding best gear design?," presented at the International Conference on Gears, Munich, 2019.

[28] M. F. Stangl, U. Kissling, and A. Pogacnik, "A procedure to find best fitting dresser with grinding worm for a new design," presented at the International Conference on Gears, Munich, 2017.

[29] K. Liston, "Hob Basics - Part II," Gear Technology, Dec. 1993.

[30] R. L. Norton, Machine Design: An Integrated Approach, 5th ed. Boston: Pearson College Div, 2013.